第 37 卷第 7 期 生 态 学 报 Vol.37,No.7
2017 年 4 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Apr.,2017

DOI: 10.5846/stxb201511212362
刘贤赵,高长春,宋炎,张勇,宿庆,田艳林.湖南市域化石能源消费碳排放时空格局及驱动因素.生态学报,2017,37(7):2476-2487.
Liu X Z,Gao C C,Song Y, Zhang Y,Su Q,Tian Y L.Temporal-spatial carbon emission patterns caused by fossil energy consumption at the city level in Hunan Province, China and the factors driving their composition.Acta Ecologica Sinica,2017,37(7):2476-2487.

湖南市域化石能源消费碳排放时空格局及驱动因素

刘贤赵[1,*],高长春[1],宋 炎[1],张 勇[1],宿 庆[2],田艳林[1]
1 湖南科技大学建筑与城乡规划学院, 湘潭 411201
2 湖南科技大学生命科学学院, 湘潭 411201

摘要:研究碳排放时空格局演变及其影响因素对指导碳减排具有重要意义。利用 2008—2013 年湖南省 14 地市规模以上工业企业终端能源消费数据,运用 IPCC 提供的参考方法和对数平均迪氏指标分解模型(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)对湖南市域碳排放量、人均碳排放量、碳排放强度的时空格局及碳排放量变化的影响因素进行了研究。结果表明:1) 2008—2013 年湖南市域碳排放量随时间变化趋势不一,大致呈 3 种类型变化;累积碳排放量居前 3 位的市域依次是娄底、岳阳和湘潭,三者累积碳排放量占全省同期的 48.92%,而吉首、张家界和怀化 3 市的累积碳排放量合计仅占全省的 2.59%。2) 湖南市域能源消费碳排放量、人均碳排放量存在相似的空间差异,二者均表现为东高西低的格局,且具有较强的相关性,碳排放量高的市域,人均碳排放量也较高;2008—2013 年湖南市域碳排放强度呈下降趋势,属于低强度区的市域由 2008 年的 4 个增加到 2013 年的 7 个,碳排放强度的空间分布与市域产业类型有关。3) 能源结构、能源强度对碳排放的增长主要起抑制作用,但能源结构的贡献很小,碳排放量的降低主要是由能源强度引起的;经济发展是碳排放增长的最主要因素,在 2008—2010 年和 2011—2013 年两个时段其累积贡献值分别为 74.285 和 27.579;人口规模对碳排放的驱动较小,在 2011—2013 年对碳排放增加产生的累积贡献值仅为 2.252。湖南当前及未来碳减排的重点是加快发展清洁能源与提高能效并重,优化能源结构和促进产业结构升级,从战略层面促进湖南"四大区域"协调发展。

关键词: 化石能源;碳排放;时空格局;湖南市域

Temporal-spatial carbon emission patterns caused by fossil energy consumption at the city level in Hunan Province, China and the factors driving their composition

LIU Xianzhao[1,*], GAO Changchun[1], SONG Yan[1], ZHANG Yong[1], SU Qing[2], TIAN Yanlin[1]
1 *College of Architecture and Urban Planning, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan* 411201, *China*
2 *College of Life Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan* 411201, *China*

Abstract: To reduce carbon emission, there is a need to explore the spatio-temporal evolution patterns of carbon emissions and the factors that influence this process. The terminal energy consumption data of industrial enterprises above a designated size in 14 cities in Hunan Province, China, from 2008 to 2013, were used to study the temporal-spatial patterns and the factors influencing carbon emissions, per capita carbon emissions, and carbon emission intensity at the city scale in Hunan Province. These factors were analyzed using the reference approach provided by the IPCC and the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI). The results showed that 1) from 2008 to 2013, different cities had different carbon emission growth trends, which could be classified into three categories. The top three cities for cumulative carbon emissions were Loudi, Yueyang, and Xiangtan, and their total cumulative carbon emissions accounted for 48.92% of the province's total carbon emissions over the study period. In contrast, the total cumulative carbon emissions from Jishou, Zhangjiajie, and Huaihua accounted

基金项目:教育部人文社科项目(14YJAZH050);湖南省社会科学基金项目(14YBA170)
收稿日期:2015-11-21; **网络出版日期**:2016-08-30
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xianzhaoliu@ sina.com

for only 2.59%. 2) The city-level carbon emissions and per capita carbon emissions in the eastern cities were higher than those in the western cities of Hunan Province. Furthermore, carbon emissions and per capita emissions were strongly correlated. The cities with high carbon emissions had higher per capita carbon emissions. However, carbon emission intensities from each city in Hunan Province decreased over the period, and the number of cities classified as being in a low-carbon-emission intensity region increased from four in 2008 to seven in 2013. The spatial distribution of carbon emission intensity was related to the type of industry in the city. 3) The energy structure and energy intensity factors could reduce carbon emission growth, but the energy structure contribution was very small and the reduction in carbon emissions was mainly caused by energy intensity. Economic development had the strongest positive impact on carbon emissions, and its cumulative contribution values were 74.285 and 27.579 during 2008—2010 and 2011—2013, respectively. Population size had a small effect on carbon emission, and its cumulative contribution to carbon emissions was only 2.252 in 2011—2013. The focus of current and future carbon emission reduction in Hunan is to accelerate the development of clean energy, improve energy efficiency, promote the optimization and upgrading of energy and industrial structures, and, at a strategic level, to enhance the coordinated development of the four regions in Hunan.

Key Words: fossil energy; carbon emission; temporal-spatial pattern; city level in Hunan Province

气候变化不仅是生态环境问题,更是对区域经济社会可持续发展的严峻挑战[1]。IPCC 第四次评估报告认为,过去 50 年全球平均气温的升高,90%以上与人类活动产生的温室气体有关,而传统的化石能源消费产生的 CO_2 等温室气体是造成全球温室效应的主要原因[2]。因此,降低 CO_2 等温室气体排放、减缓气候变暖进程已成为全球面临的共同课题。我国改革开放 30 多年来,经济持续快速增长,城市化和工业化快速推进,导致化石能源消费长期处于高位增长态势,由此引发能源消费碳排放迅速增长。据 2012 年国际能源署(IEA)的统计数据显示,中国能源消费碳排放量已于 2007 年的 60.37×10^8 t 超过美国,成为世界上最大的碳排放国[3]。尽管目前尚未被列入为京都议定书第一批限定的碳减排国家的行列,但中国碳排放问题却引起了世界各国的关注。作为负责任的大国,中国政府承诺到 2020 年单位 GDP 碳排放量在 2005 年的基础上下降 40%—45%,并将其作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划中。

目前,国内外诸多学者对能源消费碳排放的区域差异、碳排放驱动因素和经济发展与碳排放的关系以及碳减排路径等方面做了大量的研究[4-16]。彭觅等[12]采用 1998—2007 年 30 个省份的能源消耗、工业产业、交通和生活数据,从省域层面上分析了碳排放总量和单位 GDP 碳排放量的空间差异和变动情况。李国志等[17]对我国 30 个省份 CO_2 排放量进行了测算,将其分为低排放、中排放和高排放 3 个区域并进行比较,发现 3 个区域的 CO_2 排放存在明显差异,并且差异性不断扩大。原嫄等[18]基于多国数据,对全球尺度下产业结构对区域碳排放的影响进行了研究,指出第二产业份额对碳排放的影响强度为恒正值,而服务业的影响强度则逐步降低。谭丹等[19]采用灰色关联度方法分析了中国东、中、西部 3 大区域生产总值与碳排放之间的关系,进而解释了碳排放存在差异的原因。李卫兵等[20]基于 STIRPAT 模型,对全国和东、中、西部地区的碳排放驱动因素进行了深入考察,结果表明,人口、富裕程度、第二产业发展和能源强度都会对碳排放产生影响,而城市化水平、第三产业对碳排放的影响并不显著,EKC 曲线不适用中国的碳排放和经济发展水平。蒋金荷[21]利用对数平均迪氏指标分解模型(LMDI)定量分析了影响中国 1995—2010 年碳排放变化的因素,指出影响碳排放变化最大的因素是经济发展。Ferdinand 等[22]也采用 LMDI 法对美国 1990—2004 年的碳排放量进行因素分解,发现人均 GDP、能源结构、能源强度是影响碳排放的主要因素。Ang[23]利用分析架构模型对中国 1953—2006 年碳排放进行了研究,认为技术转让与对国外先进技术的吸收能力对碳排放具有抑制作用,而化石能源消耗增加、收入提高以及贸易开放广度对碳排放具有促进作用。也有多位学者开展了湖南省能源消费碳排放的研究[24-27]。如赵先超等[25]基于碳均衡视角,利用碳排放、碳吸收、净排放测算模型,估算模拟并分析了湖南省碳排放与碳吸收的时空差异,得出化石燃料燃烧碳排放是湖南省最主要的碳源;黄诚和陈晓红[26]在扩展 Kaya

恒等式的基础上,运用 LMDI 模型和 DPSIR 框架对湖南省 1998—2011 年碳排放的驱动因素进行研究,并构建了测度湖南省碳排放的脱钩效应指数;尹向飞[27]利用 STIRPAT 扩展模型,基于 1985—2007 年数据探讨了人口、消费、年龄结构和产业结构对湖南省碳排放的影响,并提出了相关对策和建议。

尽管上述成果对湖南市域碳排放的研究具有一定的借鉴作用,但多数研究主要集中在国家层面、东中西部三大区以及单个的省份[16,28-35],而且关于湖南省能源消费与碳排放的相关分析也并不十分深入,不能具体反映某个市域的碳排放特征。而我国区域资源禀赋、产业结构、能源消费、人口以及经济发展水平存在明显的空间差异,即使在省域内部也存在显著的不同。因此,较粗的碳排放数据难以精确反映区域格局特征,更不利于寻求合理的碳减排政策的制定。而对区域碳排放格局的研究来说,细化到市域尺度既是制定差异化精准减排政策和目标的需要,又是对现有碳排放研究在更小尺度上的延伸。

湖南作为中部六省之一,位于中国中南部(108°47′—114°5′E,24°8′—30°08′N),地处长江经济带腹地,辖长沙、株洲、湘潭、常德、益阳、娄底、邵阳、衡阳、岳阳、永州、怀化、郴州、张家界和吉首等 14 个地市,既是我国中部地区两型社会建设综合配套改革试验区,又是国家产业转移的重要承接地。近年来,随着工业化、城市化进程的加快和人民生活水平的不断提高,湖南经济增长对能源的需求和由此产生的碳排放将会明显增加。而湖南缺煤少油少气的事实和环境现状,要求湖南走低碳高效的绿色发展之路。然而,湖南各市域经济发展、产业结构和能源消费等差异较大,碳排放格局也明显不同。因此,在经济新常态的背景下,迫切需要查清各市域碳排放的时空格局及其影响因素,以便有针对性的提出与该地区相适应的碳减排政策及发展低碳经济的措施。本文借助 IPCC 提供的碳排放估算方法和 LMDI 模型,分析湖南市域 2008—2013 年的碳排放时空格局及其驱动因素,对发展绿色湖南、建立一套适合两型社会的碳减排策略具有一定的指导意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 碳排放量估算

利用《IPCC 国家温室气体清单指南》中提供的基准方法,根据各地市规模以上工业企业实际消耗的 8 种化石终端能源(原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气)的消耗总量估算湖南各市域 2008—2013 年(因 2008 年以前湖南市域尺度的能源消耗数据难以获取)的 CO_2 排放量(未考虑加工与转换的火力发电、供热、炼焦和炼油导致的碳排放及生活能源消费碳排放,下文述及的碳排放均指 CO_2 排放),其计算公式如下:

$$C_E = \sum_{i=1}^{n} E_i \times e_i \times p_i \times 44/12 \tag{1}$$

式中, C_E 为市域各类化石能源消耗产生的碳排放量; E_i 为第 i 类化石能源的消耗量; e_i 和 p_i 分别为第 i 类化石能源的标准煤折算系数(取自《中国能源统计年》)和碳排放系数(取自 IPCC 参考值); n 为能源种类, 44/12 表示 CO_2 与碳的分子量之比。8 种化石能源的碳排放计算参数如表 1。

表 1 8 种主要化石能源的碳排放计算参数

Table 1 Calculation parameters of carbon emissions from 8 main fossil fuels

能源类型 Energy types	原煤 Raw coal	焦炭 Hard coke	原油 Crude oil	汽油 Gasoline	煤油 Kerosene	柴油 Diesel oil	燃料油 Fuel oil	天然气 Natural gas
折标准煤系数 Standard coal coefficient /(10^4tce/10^4t)	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.4571	1.4286	1.3300
碳排放系数 Carbon emission coefficient /(10^4t/10^4tce)	0.7559	0.8550	0.5857	0.5538	0.5714	0.5921	0.6185	0.4483

1.2 数据来源与处理

8 种化石能源消耗数据、人口数据和社会经济数据均来自 2009—2014 年《湖南省统计年鉴》,市域空间数据来源于国家基础地理信息中心 1:400 万数据库;各市域经济数据按 2008 年不变价进行计算,以剔除价格因素变动产生的影响。

1.3 碳排放驱动因素分解方法

为探讨湖南市域碳排放的驱动因素以及各因素对碳排放的影响程度,作者基于 Kaya 恒等式将湖南各市域碳排放总量与各个影响因素之间的关系表示为:

$$CO_2=\frac{CO_2}{PE}\times\frac{PE}{GDP}\times\frac{GDP}{POP}\times POP \tag{2}$$

式中,POP、GDP、PE 和 CO_2依次为人口总数、地区国内生产总值、能源消费总量(即上述 8 种终端能源)和碳排放量。令 $F=CO_2/PE$,表示能源结构水平;$T=PE/GDP$,表示能源强度;$G=GDP/POP$,表示经济发展水平;$P=POP$,表示人口规模。

定义从基年(用 0 表示)到 t 年的碳排放量变化值为总效应(ΔCO_{2tot}),根据无残差项的 LMDI 模型,将碳排放总效应 ΔCO_{2tot}可分解为其它因素不变情况下的能源结构(指一次和二次能源)效应(ΔCO_{2F})、能源强度效应(ΔCO_{2T})、经济发展效应(ΔCO_{2G})和人口规模效应(ΔCO_{2P})引起的碳排放变化,用式表示如下:

$$\Delta CO_{2tot}=CO_2^t-CO_2^0=\Delta CO_{2F}+\Delta CO_{2T}+\Delta CO_{2G}+\Delta CO_{2P} \tag{3}$$

其中,ΔCO_{2F}、ΔCO_{2T}、ΔCO_{2G}和 ΔCO_{2P}分别计算如下:

能源结构效应:
$$\Delta CO_{2F}=\left(\frac{CO_2^t-CO_2^0}{\ln CO_2^t-\ln CO_2^0}\right)\times\ln\frac{F^t}{F^0} \tag{4}$$

能源强度效应:
$$\Delta CO_{2T}=\left(\frac{CO_2^t-CO_2^0}{\ln CO_2^t-\ln CO_2^0}\right)\times\ln\frac{T^t}{T^0} \tag{5}$$

经济发展效应:
$$\Delta CO_{2G}=\left(\frac{CO_2^t-CO_2^0}{\ln CO_2^t-\ln CO_2^0}\right)\times\ln\frac{G^t}{G^0} \tag{6}$$

人口规模效应:
$$\Delta CO_{2P}=\left(\frac{CO_2^t-CO_2^0}{\ln CO_2^t-\ln CO_2^0}\right)\times\ln\frac{P^t}{P^0} \tag{7}$$

2 结果与分析

2.1 湖南市域碳排放的时间格局特征

图 1 显示,2008—2013 年湖南各市域能源消费碳排放呈现出不同的变化趋势。根据增长速率和碳排放量变化的差异可划分为 3 种类型:①高速增长型(图 1),初始碳排放量大,中后期维持高排放,碳排放年均增长率显著高于全省平均水平(2.37%),重工业化的经济结构特征明显,代表市域为岳阳(年均增长率 7.14%)、娄底(年均增长率 9.02%),其中娄底碳排放量在 2013 年占全省的 22.48%;②中速下降型(图 1),初始碳排放量较低,随后呈中速下降趋势,碳排放为负增长,代表市域为怀化(年均增长率-6.15%)、吉首(年均增长率-5.07%)和邵阳(年均增长率-4.67%);③先升后降型,即以 2011 年为分界点,在此以前碳排放量呈增加趋势,而在此之后则呈减少趋势(图 1),碳排放年均增长率变化在 0.29%—7.83%。根据初期碳排放量的差异,该类型又分为 3 种情况:一是初始碳排放量较大,随后中低速增加,中后期下降但维持在较高排放,代表市域有湘潭(年均增长率 3.88%)、衡阳(年均增长率 2.37%)和郴州(年均增长率 4.72%);其次是初期碳排放量中等,随后低高速增加,中后期下降但仍维持中等排放,代表市域有长沙(年均增长率 0.29%)、株洲(年均增长率 3.39%)、常德(年均增长率 7.83%)和益阳(年均增长率 2.94%);三是初期碳排放量低但随后中速增加,中后期下降且维持低排放,代表市域为张家界(年均增长率 4.63%)和永州(年均增长率 4.03%)。

从累积碳排放量来看(表 2),2008—2013 年湖南市域累积碳排放最高的是娄底,其次是岳阳,湘潭以 13550.6×10^4 t 位居第三,三者累积碳排放总量占全省同期累积碳排放总量的 48.92%;累积碳排放靠后的 3 个市域依次是吉首、张家界和怀化,它们的累积碳排放量合计为 3351.0×10^4 t,仅占全省同期的 2.59%。能源消费碳排放量的高低一般与产业结构密切相关。娄底、岳阳、湘潭 3 市累积碳排放量较大与其传统的钢铁、石化、有色冶金等高耗能产业导致的能源消费量居全省前列有关。如 2013 年娄底、岳阳、湘潭规模工业综合能

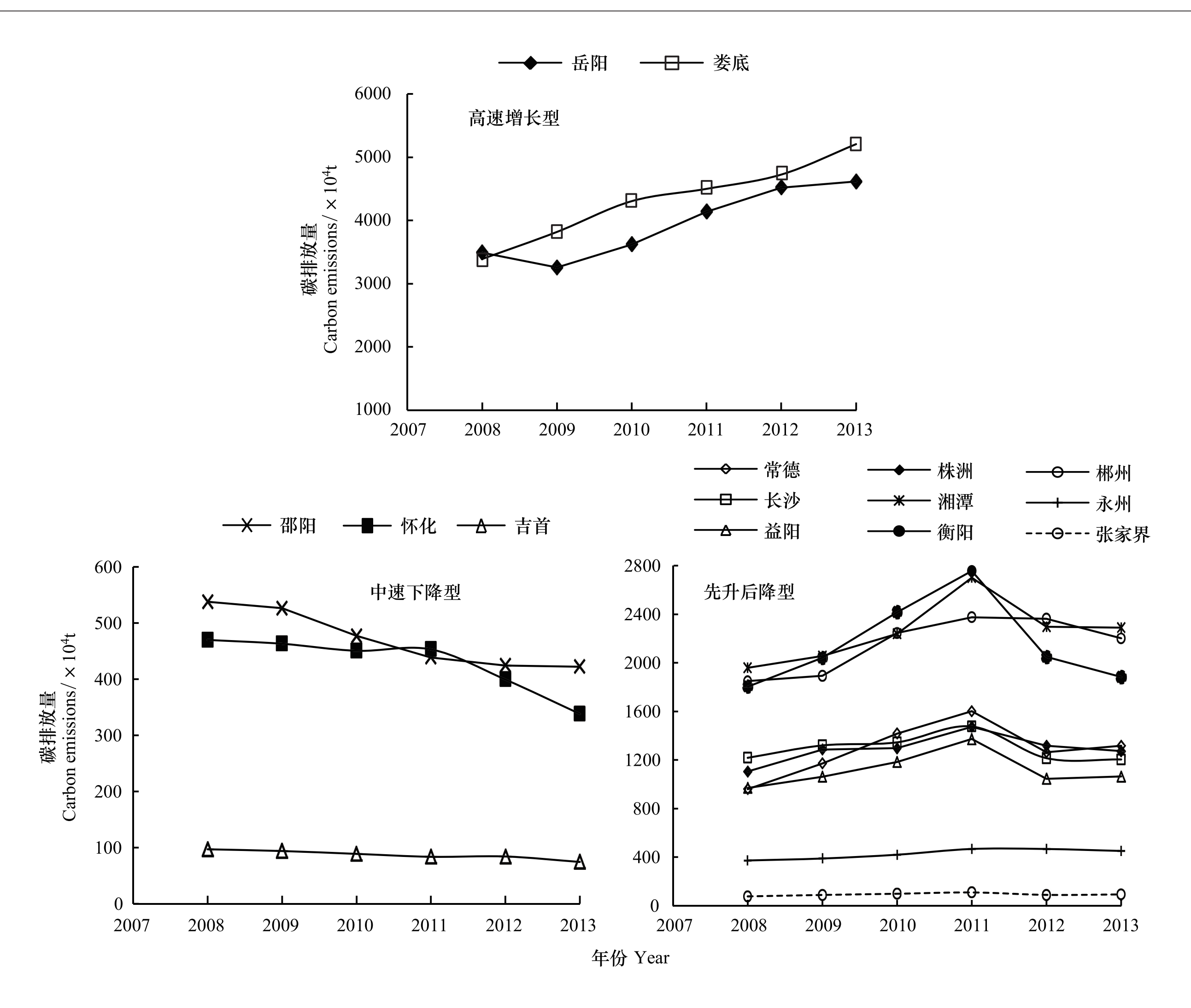


图 1 2008—2013 年湖南省各市域碳排放量变化

Fig.1 Variations in carbon emissions at the city-level in Hunan Province from 2008 to 2013

源消费量分别为 $1097.02×10^4$、$1029.35×10^4$、$654.85×10^4$ t 标准煤,分别占全省规模工业能源消费量比重的 16.3%、22.6%和 15.3%[36],而在有碳排的能源中,煤炭的碳排放系数仅次于焦炭(表 1),从而导致娄底、岳阳、湘潭的累积碳排放量较高;张家界、吉首与怀化多为旅游型城市上,支柱产业多为第一产业或第三产业,经济发展对耗能产业的依赖较小,使得该区域成为湖南省碳排放的低值区。

表 2 2008—2013 年湖南市域化石能源消费累积碳排放量/10^4 t

Table 2 Cumulative carbon emissions caused by fossil energy consumption at the city-level in Hunan Province during 2008—2013

长沙	株洲	湘潭	衡阳	邵阳	岳阳	常德	张家界	益阳	郴州	永州	怀化	娄底	吉首
7878.7	7853.9	13550.6	12951.1	2826.0	23637.9	7868.9	556.2	6698.7	13026.7	2567.3	2273.6	25941.3	521.2

2.2 湖南市域碳排放的空间格局特征

为揭示湖南市域能源消费碳排放的空间特征,对计算获取的湖南市域碳排放横截面数据进行分类归档,并运用 ArcGIS 10.2 软件制图,分别对 2008 年和 2013 年湖南市域碳排放总量、市域人均碳排放量和市域碳排放强度进行空间格局分析。

2.2.1 市域碳排放总量的空间格局变化

图 2 结果显示,湖南市域能源消费碳排放存在显著的空间差异,碳排放总体上呈东高西低的格局。从 2008 年各市域碳排放量来看,碳排放量最高的是岳阳($3492.3×10^4$ t),其次是娄底($3390.0×10^4$ t),二者碳排

放分别属于超重型和重型;长沙(1318.0×10^4 t)、株洲(1104.8×10^4 t)、湘潭(1959.6×10^4 t)、衡阳(1804.3×10^4 t)、郴州(1849.6×10^4 t)碳排放属于中型,邵阳、怀化、永州、吉首、常德、益阳与张家界的碳排放量处于 76.9—960.2×10^4 t,明显低于全省平均值 1307.4×10^4 t,属于轻型碳排放,碳排放量最低的为张家界(76.9×10^4 t)。2013 年除长沙、怀化、吉首等市域外,多数市域碳排放较 2008 年均有不同程度的增加。其中,娄底碳排放量由原来的重型跨入超重型,湘潭、郴州两市则由中型碳排放转变为重型碳排放,常德、益阳由轻型碳排放转变为中型碳排放。除中型碳排放的市域数量保持不变外,轻型碳排放的市域由 2008 年的 7 个下降到 2013 年的 5 个,重型以上碳排放的市域由 2008 年的 14.3%上升到 2013 年的 26.6%,这与部分市域第二产业比重过大以及在追求经济增长时过度依赖消耗化石能源这种粗放的经济增长方式导致的高排放有关,同时也暗示湖南碳减排的形势不容乐观,进一步削减碳增量、控制碳总量将是湖南较长一段时间内需要考虑的现实问题。

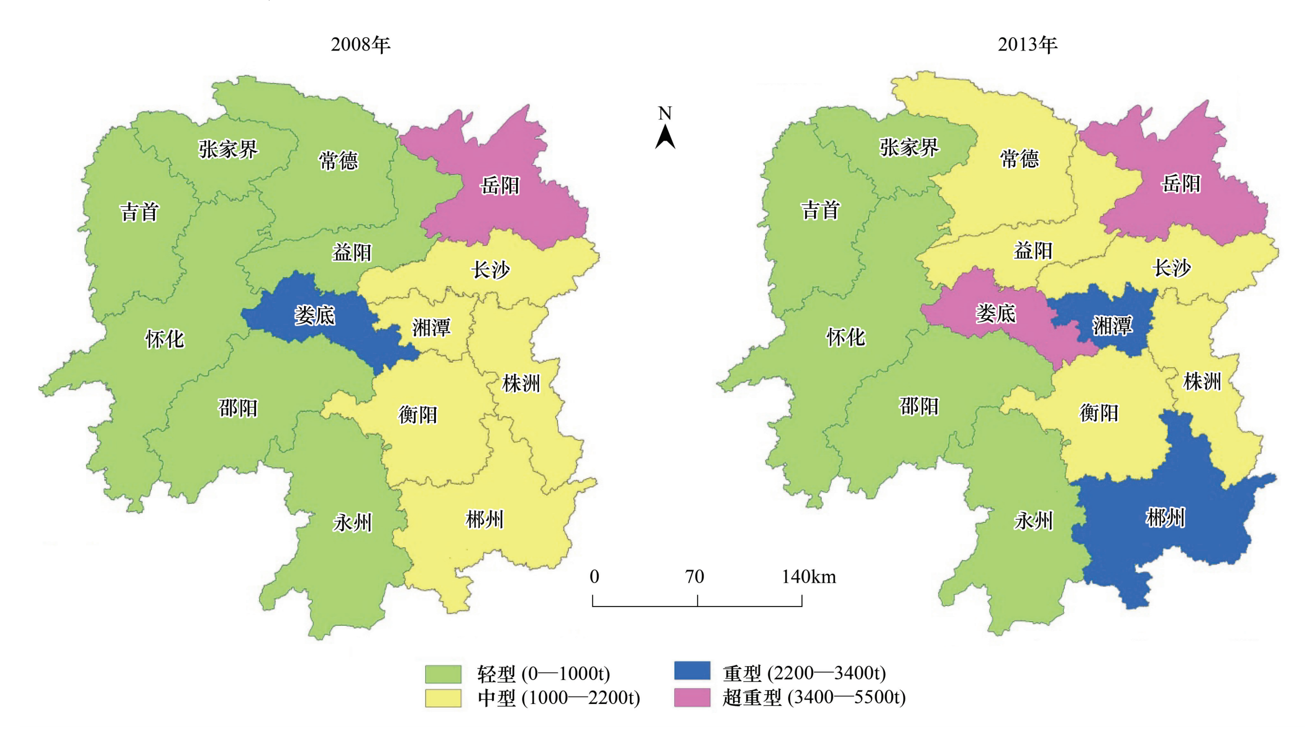


图 2　2008 年和 2013 年湖南市域能源消费碳排放空间格局

Fig.2　Spatial carbon emission patterns caused by energy consumption at the city-level of Hunan Province in 2008 and 2013

2.2.2　市域人均碳排放量的空间格局变化

人均碳排放是反映人口对有限碳排放空间占有程度的指标,能体现能源使用和碳排放的公平性[37]。图 3 显示,湖南省人均碳排放也存在明显的市域差异,总体上表现出与市域碳排放量相似的空间格局,即人均碳排放量显示出东高西低的特征。2008 年,娄底的人均碳排放量最高(8.10 t),其次是湘潭(6.67 t)、岳阳(6.64 t),人均碳排放量明显高于全省 14 地市的平均值(2.71 t),属湖南省人均碳排放高值区;而湖南西北部、西部以及西南部,市域人均碳排放量普遍较低,常德、吉首、张家界、怀化、邵阳和永州 6 市的人均碳排放位于 0.35—1.65 t 之间,明显低于全省平均值,属湖南人均碳排放低值区,最低值出现在湘西的吉首(0.35 t);益阳、长沙、株洲、衡阳、郴州 5 市的人均碳排放量处于 1.86—3.71 t 之间,围绕平均值上下波动,属湖南人均碳排放中值区。2013 年市域人均碳排放空间格局基本未发生变化(与 2008 年相比),但各市域之间人均碳排放的差异性明显加大。如娄底的人均碳排放量由 2008 年的 8.1 t 增加到 13.6 t,而吉首的人均碳排放则由 2008 年的 0.35 t 减少到 0.32 t,前者是后者的 42 倍,且娄底、湘潭和岳阳从 2008 年的高值区跨入到 2013 年的超高值区,人均碳排放量的变差系数由 2008 年的 0.91 上升到 2013 年的 1.06。

2.2.3　市域碳排放强度的空间格局变化

碳排放强度是指生产万元 GDP 所释放的碳排放量,是衡量经济结构合理性和经济发展中科学技术水平

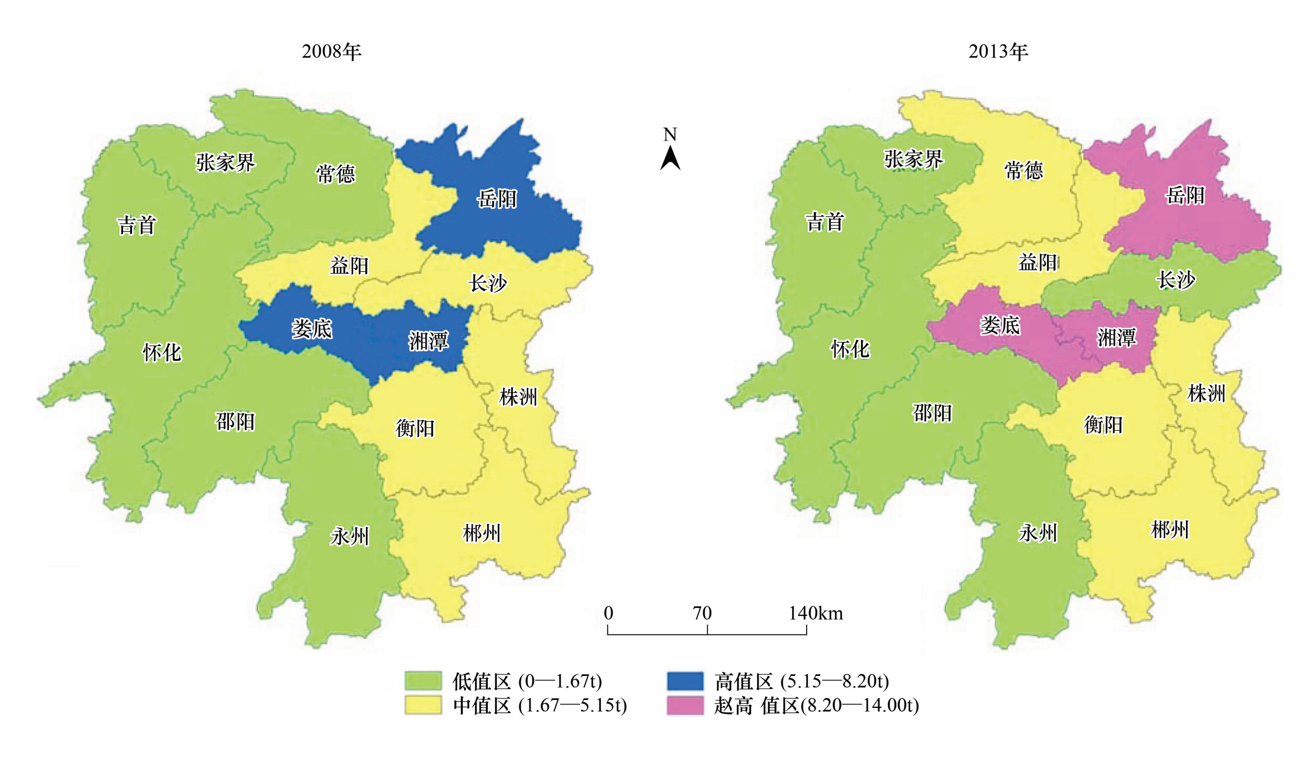


图 3 2008 年和 2013 年湖南市域人均碳排放空间格局

Fig.3 Spatial patterns of per capita carbon emissions at the city-level in Hunan Province in 2008 and 2013

的重要指标,也可以理解为相对碳排放效率(与碳排放强度为负向特征)。图 4 显示,湖南省碳排放强度在地理空间上也表现出显著的市域差异,但变化规律并不明显。2008 年,娄底的碳排放强度最大(6.42 t),其次是岳阳(3.28 t)、湘潭(3.28 t)、郴州(2.38 t)、衡阳(1.80 t)、益阳(1.70 t)、株洲(1.41 t)、邵阳(0.96 t)、常德(0.95 t)、长沙(0.84 t)、怀化(0.73 t)、永州(0.63 t)、吉首(0.43 t),张家界市的碳排放强度最小(0.42 t)。其中,娄底、岳阳、湘潭、郴州 4 市的碳排放强度变化在 2.38—6.42 t 之间,明显高于全省 14 地市碳排放强度的平均值(1.77 t),属于湖南省超高强度区和高强度区;怀化、永州、吉首、张家界 4 市的碳排放强度处于 0.42—0.84 t之间,明显低于全省 14 地市的平均值,属湖南省低强度区;其它 6 市则为中强度区,碳排放强度基本与平均值持平(图 4)。上述碳排放强度的这种空间格局与各市产业类型密切相关,2008 年属于超高强度区和高强度区的娄底、岳阳、湘潭和郴州 4 市,其产业均以传统重工业为主(如湘潭市的冶金、有色、化工等高排放行业占 63%,远高于全省 36%的平均水平),经济发展主要依赖石油化工、煤炭、钢铁、建材等高耗能产业,从而导致碳排放强度居高不下;而处于低强度区的怀化、永州、吉首、张家界 4 市绝大多数都为旅游型城市,其经济发展对耗能产业的依赖较小,使得该区域成为湖南省碳排放的低值区[38]。2013 年,各市域碳排放强度较 2008 年均有不同程度的下降(表 3),除娄底仍属超高强度区外,岳阳已进入高强度区,低强度区的市域由 2008 年的 4 个增加到 7 个(图 4),表明作为两型社会建设试验区的湖南对低碳发展产生了较大的推动作用。

表 3 2008 年和 2013 年湖南市域能源消费碳排放强度/10^4元

Table 3 Carbon emission intensity at the city level in Hunan Province in 2008 and 2013

年份 Year	长沙	株洲	湘潭	衡阳	邵阳	岳阳	常德	张家界	益阳	郴州	永州	怀化	娄底	吉首
2008	0.84	1.41	2.99	1.80	0.96	3.28	0.95	0.42	1.70	2.38	0.63	0.73	6.42	0.43
2013	0.41	0.75	1.88	1.21	0.91	2.26	0.69	0.29	1.15	1.71	0.42	0.66	5.46	0.25
DA/%	-58.11	-46.81	-37.12	-32.78	-5.21	-31.10	-27.37	-30.95	-32.36	-28.15	-33.33	-9.59	-14.95	-41.86

DA:降幅

2.3 湖南市域碳排放驱动因素分解

根据湖南市域碳排放量的变化特征,作者将 2008—2013 年划分为 2008—2010 年和 2011—2013 年两个

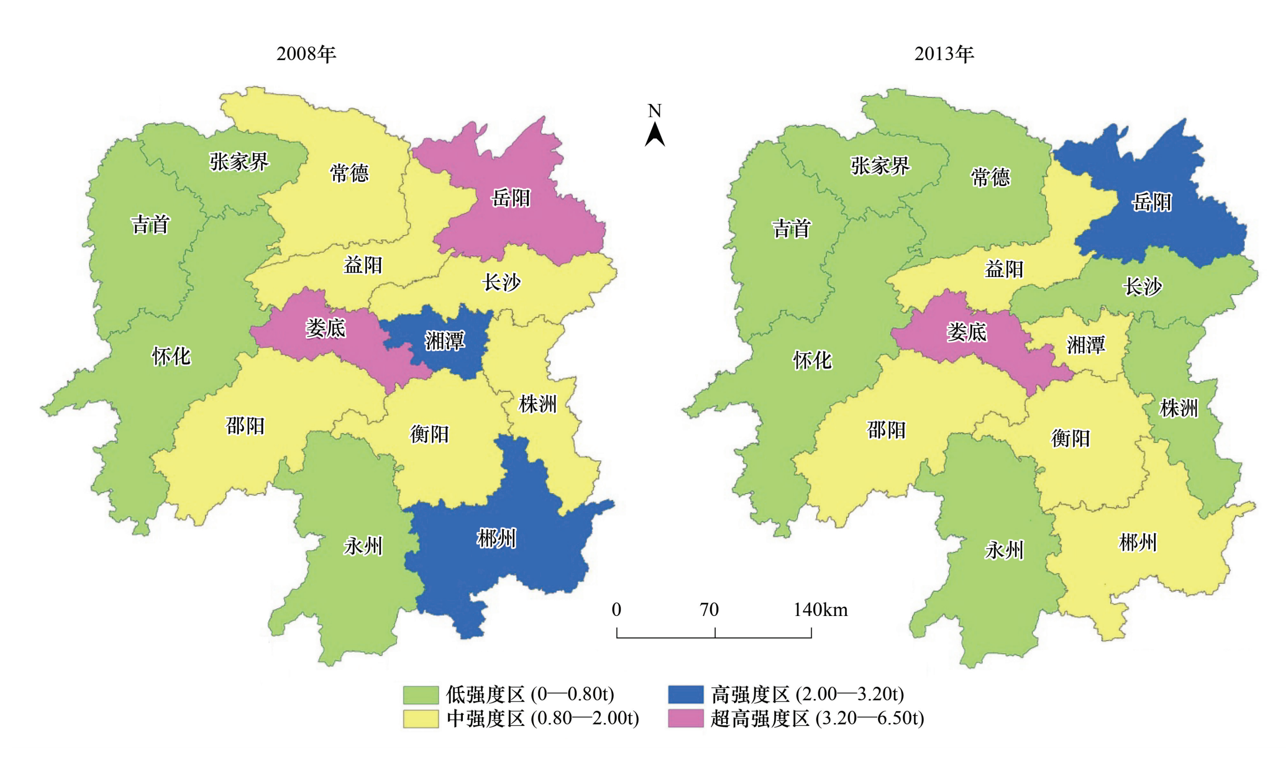


图 4　2008 年和 2013 年湖南市域碳排放强度空间格局

Fig.4　Spatial patterns of carbon emission intensity at the city-level in Hunan Province in 2008 and 2013

时段,利用式(3)对上述两个时段各市域的碳排放增量进行因素分解,设定 ΔCO_{2tot} 的绝对值为 1,得到 ΔCO_{2F}、ΔCO_{2T}、ΔCO_{2G} 和 ΔCO_{2P} 分解量的相对变化值如表 4。

表 4　2008—2013 年湖南市域碳排放增量因素分解

Table 4　Factors decomposition of carbon emission increment at the city-level in Hunan Province during 2008—2013

市域 City region	2008—2010				2011—2013			
	ΔCO_{2F}	ΔCO_{2T}	ΔCO_{2G}	ΔCO_{2P}	ΔCO_{2F}	ΔCO_{2T}	ΔCO_{2G}	ΔCO_{2P}
长沙	0.322	-13.049	9.460	4.266	-0.080	-2.079	1.069	0.090
株洲	-1.719	-29.662	30.999	1.382	-0.104	-2.359	1.369	0.094
湘潭	-0.022	-0.997	2.513	-0.494	0.040	-2.405	1.287	0.078
衡阳	0.021	0.032	1.024	-0.077	-0.005	-1.543	0.517	0.031
邵阳	-0.017	-3.131	2.684	-0.536	0.003	0.717	0.262	0.018
岳阳	-0.078	-3.433	2.474	0.038	-0.363	-2.054	3.202	0.215
常德	-0.005	0.281	0.916	-0.192	-0.008	-2.077	1.021	0.064
张家界	-0.006	-0.055	1.477	-0.417	-0.009	-2.039	0.956	0.092
益阳	0.002	0.154	1.111	-0.267	-0.005	-1.826	0.779	0.053
郴州	-0.003	-0.177	1.289	-0.109	-0.056	-9.699	8.244	0.511
永州	0.025	-1.239	3.179	-0.965	-0.302	-6.179	4.872	0.608
怀化	0.029	-7.366	7.818	-1.481	0.003	-1.727	0.670	0.053
娄底	-0.038	-0.026	1.484	-0.420	0.030	-0.492	1.388	0.073
吉首	0.378	-7.031	7.857	-2.204	0.516	-3.731	1.943	0.272
合计 Total	-1.111	-65.699	74.285	-1.476	-0.340	-37.493	27.579	2.252

2.3.1 能源结构效应对碳排放的影响

能源结构是碳排放的抑制因素之一。表 4 显示,2008—2013 年能源结构效应对碳排放的驱动具有一定的波动性。其中,长沙、衡阳、益阳、永州等市域的能源结构效应对碳排放的影响由 2008—2010 年的正向驱动转变为 2011—2013 年的负向驱动,湘潭、邵阳、娄底则由同期的负向驱动转变为正向驱动;而怀化、吉首两市的能源结构对碳排放始终为正向作用,其它市域则始终为负向驱动。能源结构效应对碳排放增长的影响与各市域高碳能源消耗(原煤、焦炭属于高碳能源,其碳排放系数远高于其它能源)占消耗能源总量的变动比例有关;能源结构效应为正时,末年的高碳能源所占比例比基期年有所升高,反之则降低(表 5)。除邵阳、张家界、郴州、永州与怀化外,其它市域均符合这一规律。此外,从表 4 还可以看出,湖南各市域能源结构效应对减少碳排放的作用不大,在 2008—2010 年与 2011—2013 年两个时段的累计贡献仅分别为-1.111 和-0.340,这可能与湖南省能源消费结构长期以化石燃料为主(2008—2013 年原煤消费在能源消耗总量中的平均比重达 63.78%)、清洁能源和其它能源为辅有关[39]。因此,要更好地发挥能源结构效应,应减少对传统化石能源的消费,加快发展新能源。

表 5 2008—2013 年湖南市域高碳能源占总能源消费的比例

Table 5 The ratios of high carbon energy in total energy consumption at the city-level in Hunan Province during 2008—2013

市域 City region	2008	2010	Δ_1	2011	2013	Δ_2	市域 City region	2008	2010	Δ_1	2011	2013	Δ_2
长沙	0.862	0.903	0.041	0.911	0.865	-0.046	张家界	0.995	0.996	0.001	0.997	0.992	-0.005
株洲	0.914	0.866	-0.048	0.895	0.853	-0.042	益阳	0.989	0.995	0.006	0.997	0.992	-0.005
湘潭	0.986	0.983	-0.003	0.983	0.992	0.009	郴州	0.994	0.996	0.002	0.994	0.992	-0.002
衡阳	0.958	0.969	0.011	0.972	0.959	-0.013	永州	0.992	0.991	-0.001	0.990	0.989	-0.001
邵阳	0.983	0.986	0.003	0.976	0.992	0.016	怀化	0.993	0.991	-0.002	0.972	0.970	-0.002
岳阳	0.409	0.376	-0.033	0.389	0.307	-0.082	娄底	0.998	0.998	0.000	0.998	0.998	-0.000
常德	0.988	0.986	-0.002	0.986	0.983	-0.003	吉首	0.705	0.774	0.069	0.776	0.905	0.129

Δ_1是 2010 年与 2008 年高碳能源占总能源消费比例的差;Δ_2是 2013 年与 2011 年高碳能源占总能源消费比例的差

2.3.2 能源强度效应对碳排放的影响

能源强度效应对湖南省多数市域碳排放的变化具有明显的抑制作用,2008—2010 年和 2011—2013 年能源强度对碳排放量变化的累计贡献值分别为-65.699 和-37.493(表 4),表明能源强度是影响能源消费碳排放变化的重要因素。由于衡阳、常德、益阳 3 市能源消费总量增加带来的碳排放增量(衡阳 612.59×10^4 t、常德 421.80×10^4 t、益阳 313.42×10^4 t)较大,使得能源强度效应对三者碳排放累积增量的影响在 2008—2010 年表现为正向,而其它市域则在整个研究期内均表现出持续的抑制作用(表 4),这主要得益于同期湖南省加速推进特色新型工业化以及节能技术改造使得工业部门的能源利用效率提高进而导致碳排放量的减少[24]。综观表 4,在 2008—2013 年,能源强度效应对碳排放量变化抑制作用最强的是株洲,其次是长沙、郴州、怀化、吉首和永州。原因是长沙、株洲位于湖南省经济活力与经济实力最强的长株潭城市群核心区域,又是国家两型社会综合配套改革试验区,“十一五”和“十二五”期间加速推进了特色新型工业化进程和节能降耗技术改造,大幅降低能源消耗强度和碳排放强度,能源消费增速放缓甚至在 2010 年后有所下降,从而使碳排放增长明显减缓;怀化、吉首和永州近年来确立了旅游强市的战略目标,经济发展对耗能产业的依赖较小,GDP 增速远高于化石能源消费增长速度;而郴州位于京广铁路和京珠高速沿线,经济较为发达,加上近年第三产业发展较快,大批高能耗、高污染企业被关停,导致能源强度大幅下降,从而对碳排放产生明显的抑制作用[40]。

2.3.3 经济发展效应对碳排放的影响

经济发展效应对湖南各市域能源消费碳排放量的增长表现出很强的正向驱动作用(表 4),成为影响碳排放量增加的最重要因素,其累计贡献值在 2008—2010 年和 2011—2013 年分别为 74.285 和 27.579。从总体上看,2008—2013 年湖南省 6 年间 GDP 实际增长 85.43%,人均 GDP 实际增长 87.05%,各市域实际 GDP 增长均

在 50.29%以上。快速的经济增长带来了终端能源消费量的迅速增加,进而使能源消费碳排放量的增长呈加速态势;加上湖南第二产业所占比重较大(由 2008 年的 43.5%上升至 2013 年的 47.0%),产业结构调整和能源利用效率成效不显著,外延式和粗放型经济增长主要依靠消耗大量的化石能源,从而导致经济发展对碳排放在两个阶段都具有较大的正向效应[41]。从经济发展对各市域碳排放变化的驱动程度看,2008—2010 年,长沙、株洲经济发展对碳排放具有显著的正向作用,二者经济发展效应引起的碳排放贡献值达 9.460 和 30.999,分别是常德的 10.3 倍和 33.8 倍(表 4),原因是长沙、株洲两市位于湖南省经济实力最强的长株潭城市群核心区域,依托湘江新区、两型社会试验区和国家自主创新示范区三大平台积极参与长江中游城市群合作与建设,对两市经济发展起到了较强的推动作用。在 2011—2013 年,多数市域经济发展对碳排放增长的驱动作用明显减弱,这可能是受 2011 年以来我国经济下行压力加大(2011—2013 年全国 GDP 增速分别为 10.4%、7.8%、7.7%)以及为实现经济“软着陆”而采取的宏观经济调控措施的影响[42],导致湖南经济发展放缓。值得关注的是,在此期间,岳阳、郴州、永州 3 市的经济发展驱动作用显著增强(表 4),其原因是,岳阳属于环洞庭湖新型城镇群区,在把洞庭湖区建设成为湖南经济社会发展新引擎中发挥着桥头堡的作用,由此带动了该市经济的快速增长;而郴州、永州是大湘南国家承接产业转移示范区的中心城市,与珠三角、港澳台、北部湾和东南亚的对接融合有利于郴州、永州在更大范围、更宽领域和更高平台上发展经济,进而使能源消费碳排放量快速增长[43]。

2.3.4　人口规模对碳排放的影响

人口规模效应对碳排放的影响程度较小,但作用方向并非始终为正(表 4)。2008—2010 年,仅长沙、株洲、岳阳 3 市人口规模对碳排放产生正向作用,其他市域则为负向作用,人口规模对碳排放增长贡献最大的是长沙。这与长沙市域农村劳动力的非农转移导致人口快速增加直接相关。据统计,2010 年长沙、株洲、岳阳人口较 2008 年分别增加了 9.1%、1.2%和 0.4%,长沙城市化率提高了近 7.0%,而同期其它市域人口不增长。人口的迅速增加和快速城市化一方面使长沙城镇规模急剧扩张,直接引起能源消费的增长;另一方面,通过改变居民生产方式和消费模式间接促进能源消费量的增加,从而导致碳排放量上升。2011—2013 年,尽管各市域人口规模对碳排放的影响均为正向效应,但对碳排放增加的贡献仍较小,全省累积贡献相对值仅为 2.252,这可能与此期间各市域人口年均增长率上升幅度较小(<1%)有关。

3　讨论与结论

目前关于能源消费碳排放的研究,主要集中在国家、区域和省域 3 个层面,从市域尺度探讨碳排放的相关报道较少。本文运用 IPCC 提供的参考方法和 LMDI 因素分解模型对工业化与城市化快速推进的湖南市域能源消费碳排放时空格局及其碳排放量的变动进行了因素分解。

(1)2008—2013 年湖南市域能源消费碳排放随时间呈不同的变化趋势,基于增长速率和碳排放量变化的差异可归纳成 3 种类型:高速增长型(岳阳、娄底)、中速下降型(怀化、吉首、邵阳)和先升后降型(湘潭、衡阳、郴州、长沙、株洲、常德、益阳、张家界、永州)。6 年间累积碳排放量居前 3 位的市域依次是娄底、岳阳和湘潭,三者累积碳排放量占全省同期的 48.92%;累积碳排放量较低的 3 个市域依次为吉首、张家界和怀化,其累积碳排放量合计为 3351.0×10^4 t,仅占全省的 2.59%。尽管能源消费碳排放变化受同期人口、经济增长、技术进步和能源消费结构等多种因素的综合影响,但在一定程度上,能源消费碳排放量与产业结构密切相关。据统计,2008—2013 年湖南省第二产业终端能源消费占全省的 85%以上,且工业能源消费在能源消耗总量中占绝对地位。如石油化工、有色冶金、水泥建材等不仅消耗能源最多,而且碳排放强度也最高(约为农业能源消费的 34.9 倍)[24]。岳阳、娄底、湘潭 3 市之所以累积碳排放量、人均碳排放量、碳排放强度均维持在较高水平,与其第二产业多为高碳排放产业密不可分(湘潭高排放行业占 63%,远高于全省 36%的平均水平),而张家界、吉首与怀化多为非高耗能、非高排放的第一产业或第三产业,经济发展对耗能产业的依赖较小,因而碳排放量较低。这也从侧面说明湖南省碳减排的重点在高排放区,而不是低排放区。

(2)湖南市域能源消费碳排放量存在明显的空间差异,总体上表现为东高西低的格局。2008 年,碳排放量最高的是岳阳(3492.3×10^4 t),其次是娄底(3390.0×10^4 t)、湘潭(1959.6×10^4 t)、郴州(1849.6×10^4 t)、衡阳(1804.3×10^4 t)、长沙(1318.0×10^4 t)、株洲(1104.8×10^4 t)、益阳(970.6×10^4 t)、常德(960.2×10^4 t)、邵阳(537.8×10^4 t)、怀化(469.8×10^4 t)、永州(372.6×10^4 t)、吉首(96.9×10^4 t),张家界碳排放量最低(76.9×10^4 t);2013 年除中型碳排放的市域数量不变外,轻型碳排放的市域由 2008 年的 7 个下降到 5 个,重型碳排放以上的市域由 2008 年的 14.3%上升到 26.6%,这可能与湖南目前正处于城市化和工业化快速推进阶段以及部分城市因第二产业比重过大而在追求经济增长过程中过度依赖消耗大量能源导致高碳排放有关。因此,进一步削减碳增量、控制碳总量将是湖南较长一段时间内亟待解决的现实问题。湖南市域人均碳排放也存在明显的区域差异,在空间格局上表现出与市域碳排放量极为相似的特征,即碳排放量高的市域,人均碳排放量一般也较高,如岳阳、娄底、湘潭 3 市既属于碳排放量(超)重型区,也属于人均碳排放量(超)高值区,这说明湖南当前处于工业化中期的城市,其碳排放总量与人均碳排放量具有较强的相关性。2008—2013 年湖南市域碳排放强度显著下降,属于低强度区的市域由 2008 年的 4 个增加到 2013 年的 7 个,表明湖南两型社会建设对低碳发展产生了积极的推动作用,但碳排放强度的空间差异性更加明显。2008 年,碳排放强度由大到小依次是娄底(6.42 t)、岳阳(3.28 t)、湘潭(3.28 t)、郴州(2.38 t)、衡阳(1.80 t)、益阳(1.70 t)、株洲(1.41 t)、邵阳(0.96 t)、常德(0.95 t)、长沙(0.84 t)、怀化(0.73 t)、永州(0.63 t)、吉首(0.43 t)和张家界(0.42 t)。碳排放强度空间分布与市域产业结构具有一定的关联性,2008 年娄底、岳阳、湘潭、郴州 4 市之所以成为碳排放的(超)高强度区,其原因在于它们的产业均以传统重工业为主,经济发展对于高耗能产业的依赖性较大,这也暗示该地区是湖南省未来碳减排潜力最大的区域;而处于低强度区的怀化、永州、吉首、张家界 4 市绝大多数都属于旅游型城市,经济发展对耗能产业的依赖较小,对于这类地区,进一步推动技术进步和做大做强第三产业是提高能源消费碳排放效率的主要途径;其它 6 市(长沙、常德、株洲、衡阳、益阳和邵阳)则为中强度区,碳排放强度基本与全省平均值持平,处于高强度向低强度的过渡区域。

(3)能源消费碳排放变化是人口规模效应、经济发展效应、能源结构效应和能源强度效应综合作用的结果。其中,能源结构效应和能源强度效应对碳排放起负向作用,但前者贡献很小,在 2008—2010 年与 2011—2013 年两个时段累计贡献值仅为-1.111 和-0.340,碳排放量的下降主要是由能源强度效应引起的;经济发展效应是碳排放增长的正向决定因素,其累积贡献值在上述两个时段分别为 74.285 和 27.579,而人口规模效应对碳排放增加的驱动较小,2011—2013 年其累积贡献值仅为 2.252。上述结果表明,经济发展是拉动湖南省碳排放增长的最主要因素,而能源强度下降则是抑制碳排放的主要推动力量,如何协调经济增长与碳排放之间的矛盾是湖南经济社会低碳发展的关键所在。此外,以高碳能源为主的能源消费结构调整成效不显著(2008—2013 年湖南省原煤消费在能源消耗总量中的平均比重达 63.78%),没能对降低碳排放产生明显的促进作用,同时,湖南省通过调整高碳型产业结构和提高能源效率来减少碳排放的空间还较大。

基于以上结论,湖南省在碳减排时建议做好以下工作:一是优化城市功能分区,明确功能定位,从战略层面促进湖南"四大区域"协调发展;二是优化能源消费结构,加快发展清洁能源与提高能效并重,减少对传统化石能源的消费;三是严控化工、冶炼、建材等高能耗高排放行业的盲目发展,积极促进旅游产业、新型服务业和战略性新兴产业等的快速发展,以便更好地发挥产业结构效应在碳减排中的作用。

参考文献(References):

[1] 邓吉祥, 刘晓, 王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解. 自然资源学报, 2014, 29(2): 189-200.

[2] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 44-45.

[3] IEA. CO_2 emissions from fuel combustion. Paris: International Energy Agency (IEA), 2012.

[4] Zhang M, Mu H L, Ning Y D. Accounting for energy-related CO_2 emission in China, 1991—2006. Energy Policy, 2009, 37(3): 767-773.

[5] Liu Y S, Yan B, Zhou Y. Urbanization, economic growth, and carbon dioxide emissions in China: a panel cointegration and causality analysis. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(2): 131-152.

[6] Su B, Ang B W. Input-output analysis of CO_2 emissions embodied in trade: a multi-region model for China. Applied Energy, 2014, 114: 377-384.
[7] Zhao X T, Burnett J W, Fletcher J J. Spatial analysis of China province-level CO_2 emission intensity. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 33: 1-10.
[8] Luukkanen J, Panula-Ontto J, Vehmas J, Liu L Y, Kaivo-oja J, Häyhä L, Auffermann B. Structural change in Chinese economy: impacts on energy use and CO_2 emissions in the period 2013-2030. Technological Forecasting and Social Change, 2015, 94: 303-317.
[9] Guo B, Geng Y, Franke B, Hao H, Liu Y X, Chiu A. Uncovering China's transport CO_2 emission patterns at the regional level. Energy Policy, 2014, 74: 134-146.
[10] Clarke-Sather A, Qu J S, Wang Q, Zeng J J, Li Y. Carbon inequality at the sub-national scale: a case study of provincial-level inequality in CO_2 emissions in China 1997—2007. Energy Policy, 2011, 39(9): 5420-5428.
[11] Dhakal S. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. Energy Policy, 2009, 37(11): 4208-4219.
[12] 彭觅, 吕斌, 张纯, 黄斌. 中国能源碳排放的区域差异及其影响因素分析. 城市发展研究, 2010, 17(7): 6-11, 44-44.
[13] 张伟, 张金锁, 邹绍辉, 许建. 基于LMDI的陕西省能源消费碳排放因素分解研究. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 26-31.
[14] 梁大鹏, 刘天森, 李一军. 基于LMDI模型的金砖五国二氧化碳排放成本及其影响因素比较研究. 资源科学, 2015, 37(12): 2319-2329.
[15] 范丹. 中国能源消费碳排放变化的驱动因素研究—基于LMDI-PDA分解法. 中国环境科学, 2013, 33(9): 1705-1713.
[16] 刘源, 李向阳, 林剑艺, 崔胜辉, 赵胜男. 基于LMDI分解的厦门市碳排放强度影响因素分析. 生态学报, 2014, 34(9): 2378-2387.
[17] 李国志, 李宗植. 中国二氧化碳排放的区域差异和影响因素研究. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(5): 22-27.
[18] 原嫄, 席强敏, 孙铁山, 李国平. 产业结构对区域碳排放的影响—基于多国数据的实证分析. 地理研究, 2016, 35(1): 82-94.
[19] 谭丹, 黄贤金. 我国东、中、西部地区经济发展与碳排放的关联分析及比较. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(3): 54-57.
[20] 李卫兵, 陈思. 我国东中西部二氧化碳排放的驱动因素研究. 华中科技大学学报: 社会科学版, 2011, 25(3): 111-116.
[21] Jiang J H. Analysis of key drivers on China's carbon emissions and policy rethinking based on LMDI: 1995-2010. Journal of Resources and Ecology, 2013, 4(4): 304-310.
[22] Vinuya F, DiFurio F, Sandoval E. A decomposition analysis of CO_2 emissions in the United States. Applied Economics Letters, 2010, 17(10): 925-931.
[23] Ang J B. CO_2 emissions, research and technology transfer in China. Ecological Economics, 2009, 68(10): 2658-2665.
[24] 陈秋红. 湖南省1995—2010年能源消费碳排放变化的因素分解分析. 华东经济管理, 2013, 27(4): 36-40, 97-97.
[25] 赵先超, 朱翔, 周跃云. 基于碳均衡视角的湖南省碳排放与碳吸收时空差异分析. 水土保持学报, 2012, 26(6): 158-163, 170-170.
[26] 黄诚, 陈晓红. 两型社会建设背景下湖南省碳排放驱动因素及脱钩效应. 系统工程, 2014, 32(11): 109-116.
[27] 尹向飞. 人口、消费、年龄结构与产业结构对湖南碳排放的影响及其演进分析——基于STIRPAT模型. 西北人口, 2011, 32(2): 65-69, 82-82.
[28] 王长建, 汪菲, 张虹鸥. 新疆能源消费碳排放过程及其影响因素——基于扩展的kaya恒等式. 生态学报, 2016, 36(8), doi: 10.5846/stxb201410152033.
[29] 赵选民, 卞腾锐. 基于LMDI的能源消费碳排放因素分解——以陕西省为例. 经济问题, 2015, (2): 35-39.
[30] 朱勤, 彭希哲, 陆志明, 吴开亚. 中国能源消费碳排放变化的因素分解及实证分析. 资源科学, 2009, 31(12): 2072-2079.
[31] 王俊松, 贺灿飞. 能源消费、经济增长与中国 CO_2 排放量变化——基于LMDI方法的分解分析. 长江流域资源与环境, 2010, 19(1): 18-23.
[32] 赵雲泰, 黄贤金, 钟太洋, 彭佳雯. 1999—2007年中国能源消费碳排放强度空间演变特征. 环境科学, 2011, 32(11): 3145-3152.
[33] 吴文佳, 蒋金亮, 高全洲, 蒋海兵. 2001—2009年中国碳排放与碳足迹时空格局. 生态学报, 2014, 34(22): 6722-6733.
[34] 宋帮英, 苏方林. 我国东中西部碳排放量影响因素面板数据研究. 地域研究与开发, 2011, 30(1): 19-24.
[35] 舒娱琴. 中国能源消费碳排放的时空特征. 生态学报, 2012, 32(16): 4950-4960.
[36] 湖南省统计局. 湖南工业能源消费结构变化研究. (2015-07-14) [2016-04-16]. http://www.hunan.gov.cn/sj/sjfx/201507/t20150714_1796307.html.
[37] Du Q, Wang N, Che L. Forecasting China's per capita carbon emissions under a New three-step economic development strategy. Journal of Resources and Ecology, 2015, 6(5): 318-323.
[38] 赵先超. 湖南省能源消费碳排放系统分析与调控[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.
[39] 唐诗佳. 基于能源消费结构和产业结构视角的湖南省碳排放研究. 湖南工业大学学报: 社会科学版, 2014, 19(3): 10-15.
[40] 唐婷, 陈昂. 湖南"十三五"区域发展布局: 构建"一核三极四带多点". 湖南日报, 2015-12-30 [2016-04-16]. http://www.hn.xinhuanet.com/2016-03/08/c_1118265594.htm.
[41] 林德勇, 唐双全, 张 晴, 黄陈武. 湖南经济结构研究. (2015-06-11) [2016-04-16]. http://www.hntj.gov.cn/fxbg/2015fxbg/2015jczx/201506/t20150611_117178.htm.
[42] 李建豹, 黄贤金, 吴常艳, 周艳, 徐国良. 中国省域碳排放影响因素的空间异质性分析. 经济地理, 2015, 35(11): 21-28.
[43] 曾斌求. 从中部崛起谈湖南产业发展的总体思路和目标定位. (2014-02-15) [2016-04-16]. http://www.chinareform.org.cn/area/middle/Report/201402/t20140216_188384.htm.